

상용 Solid Modeler 를 이용한 볼 엔드밀 가공의 절삭력 예측

이재종*(한국기계연구원), 박찬훈(한국기계연구원), 최종근(순천대학교), 박홍석(울산대)

Prediction of Cutting Force in Ball-end mill Cutting using the Commercial Solid Modeler

J. J. Lee (KIMM), C. H. Park (KIMM), J.G. Choi (Univ. of Suncheon), H.S. Park (Univ. of Ulsan)

ABSTRACT

In the metal cutting, machining accuracies had affected by tool deflection that had been generated by acting cutting force on the cutting edges. Generally, the CAD/CAM and a solid modeler had used for the simulation of cutting process only. Some NC codes for metal cutting have been generated by these simulation results. But, machining errors that had generated by the tool deflection has not solved using these system. In this study, determination algorithm for integration zone has been studied using the commercial solid modeler. The tool deflection error has calculated by the integration zone between the small chip and the cutting edges.

Key Words : Machining Accuracy(가공정도), Mold and Die(금형), Cutting force (절삭력), Tool Deflection(공구처짐), Solid Modeler(솔리드모델러), Ball-end mill(볼엔드밀)

1. 서론

가공시스템의 자동화율이 급속히 높아지면서 가공정보의 전달환경과 공작 기계의 운전조건을 일정하게 유지할 필요성이 어느 때 보다도 증대되고 있다. 그러나 절삭가공 시 절삭부하로 인한 기계구조물의 정적 처짐이나, 진동으로 인한 공구/공작물의 흔들림, 핵심부품의 발열과 열전달에 의한 열변형 오차 등으로 공작물의 가공 정밀도는 예상보다 낮게 나타나 무인화에 대비한 공작기계의 정적, 동적, 열적 구조물 개선 대책이 시급히 요구되고 있다.

특히, 고부가가치의 금형 및 정밀가공이 요구되는 제품을 가공하는 경우 실제 가공 시에 발생하는 절삭공구의 처짐, 절삭력에 의한 변형, 가공물의 변형 및 가공기 기하오차 등은 공작기계의 가공정도(machining accuracy)에 직접적인 영향을 미친다. 또한, 개발기간이 비교적 길고, 비용이 고가인 금형을 제작하는 경우 불량률은 치명적인 손실을 유발하기 때문에 사전에 가공조건, 가공기의 특성, 절삭조건, 가공물과 공구의 변형, 절삭력 등을 고려하여 가상적으로 가공공정을 시뮬레이션 또는 가상가공을 수행하여 작업조건 및 가공조건을 제공함으로써 가공오차를 줄일 수 있는 연구가 필요하다.

기존 NC 프로그래밍/검증 시스템은 단순히 기하학적 정보만을 이용하여 가공물과 절삭공구의 충돌만을 검증하여 가공물의 형상(geometric shape)이 제대로 형성되는지에 대해서만 관심이 있기 때문에

절삭가공 중에 발생하는 절삭공구의 처짐(tool deflection), 공작기계의 열변형 오차(thermal error), 기하오차(geometric error), 절삭력(cutting force)에 의한 가공기 및 가공물의 변형 등에 의해서 발생하는 가공물의 정밀도는 검증할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

따라서, 절삭조건에 따른 절삭공구의 처짐, 공작기계의 열변형 오차, 기하오차, 절삭력에 의한 가공기 및 가공물의 변형을 고려하여 가공공정을 검증함으로써 가공물의 정밀도 향상 및 품질향상을 실현할 수 있는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 상용의 솔리드 모델러 (UG V16)를 기반으로 실제 절삭가공을 하기 전에 선정된 절삭공구와 복합형상을 가지고 있는 가공물에 의해서 발생하는 공구 처짐량을 고려하여 최적 가공조건 및 가공 프로그램을 산출할 수 있는 가공공정 검증 시스템 중에서 절삭가공 중에 발생하는 절삭력에 의한 공구 처짐량을 예측할 수 있는 방안을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 볼 엔드밀을 대상으로 볼 엔드밀의 각 절삭날에 의해서 형성되는 미소 절삭칩의 형상과 절삭작업에 참여하는 칩의 접분구간을 산출하여 절삭력을 산출하여 공구 처짐량을 산출했다.

2. 절삭력의 예측

볼 엔드밀을 이용하여 3 차원 가공을 수행할 때 이송은 수직과 수평의 2 가지 방향으로 발생하게

되는데 공구날의 위치에 따라서 미변형칩의 두께 (t_c)는 달라지게 된다. Fig. 1 에서 F_h, F_v 는 각각 수평 및 수직방향의 이송량을 의미한다. 가공 시에 공구에 작용하는 절삭력을 계산하기 위해서는 미소 높이(dz)의 공구단면을 고려하는 것이 편리하다. Fig. 1 에서 오른쪽 그림은 $A-A'$ 평면을 기준으로 두께가 dz 인 공구단면을 나타낸다. 이 단면에서 미변형칩의 두께(t_c)는 식(1)로 표현될 수 있다 [1]. 이때 중요한 것은 식(1)은 절삭에 참여하는 공구 부분에 대해서만 계산되면 된다는 점이다. 즉, 미변형칩의 두께는 가공물의 형상에 상관없이 식(1)에 의해서 계산될 수 있으며, 선택된 공구 단면이 가공에 참여하는 경우에만 의미가 있다. 따라서 입의 공구단면이 절삭에 참여하는지 혹은 그렇지 않은지를 반드시 판단하여야 한다. 그러나 가공물의 형상이 단순하지 않을 경우는 이러한 판단을 하기가 매우 어렵다.

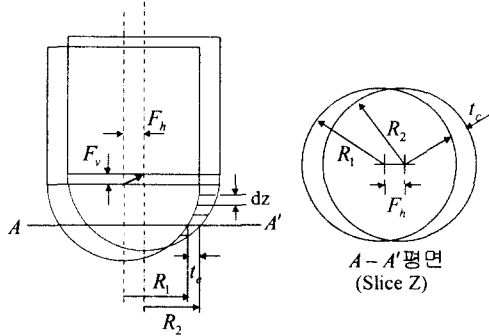


Fig. 1 Radial chip thickness and feed for 3-axis tool path

$$t_c(\theta, z) = R_2(z) + F_h \sin\theta - \sqrt{[R_2^2(z) - F_h^2 \cos^2(\theta)]} \quad (1)$$

미소 두께 dz 의 선택된 공구단면에 작용하는 절삭력은 식(2)을 이용하여 계산할 수 있다. 식(2)에서 $dA_r(\theta, z), ds(z)$ 는 각각 미소 칩 접촉 면적과 미소 절삭날 길이를 의미한다. 미소 칩 접촉 면적은 미변형 칩 두께의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} d\bar{F}_{nr}(\theta, z) &= K_{nr}(z)dA_r(\theta, z) \\ d\bar{F}_{fr}(\theta, z) &= K_{fr}(z)dA_r(\theta, z) \\ d\bar{F}_{ne}(\theta, z) &= K_{ne}(z)ds(z) \\ d\bar{F}_{fe}(\theta, z) &= K_{fe}(z)ds(z) \end{aligned} \quad (2)$$

$d\bar{F}_{nr}, d\bar{F}_{fr}, d\bar{F}_{ne}, d\bar{F}_{fe}$ 는 각각 공구 여유면에 작용하는 힘과 절삭날 상에 작용하는 힘을 의미한다. 이 힘들에 대응하는 각각의 절삭 계수들

($K_{nr}, K_{fr}, K_{ne}, K_{fe}$)은 실험을 통해서 구해질 수 있다[1].

이제 식(3)과 같이 식(2)의 미소 힘들을 각각의 선택된 공구단면에 대해서 적분함으로써 공구 전체에 걸리는 힘의 합력을 계산할 수 있다. 그러나 이러한 적분은 가공물의 형상과 직접적인 관계가 있다. 즉, 전술한 바와 같이 식(2)를 이용하여 미소 두께 dz 로 얇게 잘라진 공구단면에 작용하는 힘을 계산할 때, 절삭에 참여하지 않는 공구단면은 적분에서 제외되어야 한다. 따라서 적분 구간 (Z_{in}, Z_{out})의 설정이 매우 중요한 문제가 되는데 이것은 가공물의 형상이 복잡할 경우 매우 어려운 작업이 된다. 논문 [6]에서는 Z-map 이 지원되는 3D Modeler 를 사용하여 적분 구간을 결정하는 방식이 소개되고 있지만, 대부분의 3D Modeler 는 Z-map 보다는 Boolean Operation 을 지원한다는 점을 고려해서 본 연구에서는 Boolean Operation 의 사용이 가능한 상용의 3D Modeler 를 선택했다.

식(1)에서 계산되는 미변형 칩 두께는 3D Modeler 를 사용해서 결정하는 것이 가능하다. 그러나 식(1)을 통해서 계산하는 것보다 정확도 면에서 큰 이점을 가지지 못할 뿐만 아니라 Boolean Operation 을 거쳐야 하기 때문에 더 많은 시간이 소요된다. 따라서 적분구간은 3D Modeler 를 이용하여 얻고, 미변형 칩 두께는 식(1)에 의해서 계산한다.

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \int_{Z_{in}}^{Z_{out}} [K_{nr}(z)\bar{n}_r(\theta, z) + K_{fr}(z)\bar{n}_r(\eta_c, \theta, z)]dA_r(\theta, z) \\ &+ [K_{ne}(z)\bar{n}_e(\theta, z) + K_{fe}(z)\bar{n}_{fe}(\theta)]ds(z) \end{aligned} \quad (3)$$

절삭력의 계산을 위해서 본 논문에서는 논문 [1]에서 제안된 방법 식(1) ~ 식(3)을 사용했지만 절삭력의 예측 방법은 많은 논문들([2]-[6])에서 상당히 다양하게 제시되고 있다. 그러나 대부분의 논문들에서 제시하는 방법론에서 적분구간의 선택이 실질적인 어려움이 되고있다.

3. 적분 구간의 선택

2 장에서는 공구에 작용하는 절삭력의 예측을 위해서는 적분구간의 결정이 중요하고도 매우 어려운 문제임을 설명했다. 본 장에서는 상용 3D Modeler 를 사용해서 적분구간을 결정하는 방법에 관해 설명할 것이다. 본 연구에서는 UG V16 을 사용했다. UG 를 선택한 것은 산업계에서 상당이 많은 사용자를 확보하고 있을 뿐만 아니라 본 연구를 위한 충분한 기능을 제공하기 때문이다. 특히 UG 의 기본 기능들을 이용해서 사용자 정의 모듈을 만들어서 좀더 확장성 있는 작업이 가능하도록 해주는 인터페이스 함수(UFUNC)들을 가지고 있어서 사용자는 자신이 원하는 기능을 DLL 형태의 라이브

러리로 만들어서 UG 에서 실행할 수 있다. 본 연구에서도 적분 구간의 선택을 가능하게 해주는 사용자 정의 모듈을 UFUNC 을 사용해서 구현했다.

절삭력 계산을 위한 Simulation 프로그램을 실행하기 전에 가공계획이 미리 수립되어 있어야 하는데 이러한 작업은 UG 를 이용해서 간단히 수행될 수 있다. Fig. 2 는 UG 를 사용해서 가공계획을 수립한 후 최종적으로 CL 데이터를 생성하는 화면을 보여주고 있다. 이것은 상용 3D Modeler 를 사용해서 얻을 수 있는 큰 장점이 된다.

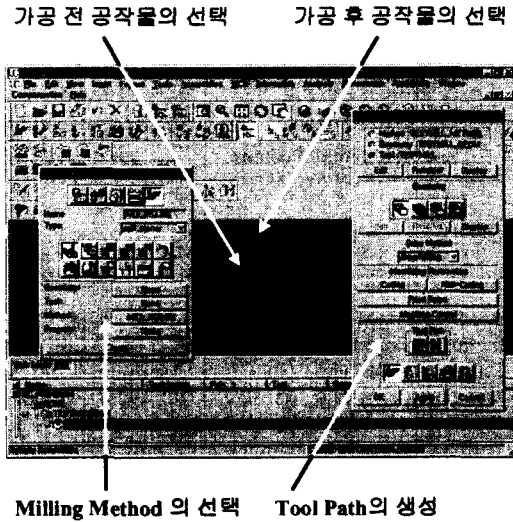


Fig. 2 Simulation for Determination of Cutting Force

Fig. 2 는 본 연구에서 개발된 Simulation 모듈을 이용하여 공구의 절삭력 예측을 실행한 화면이다. 공작물의 3 차원 도면이 입력되면 사용자는 도면 중에서 가공할 부분을 선택할 수 있고 공구에 관한 정보(절삭날의 개수, Feed Rate, Helix Angle 등)를 입력함으로써 절삭력 예측을 위한 Simulation 을 시작할 수 있다. 이 프로그램은 UG 에서 제공되는 API 인 UFUNC 을 통해서 DLL 로 구현되었다. 따라서 UG 를 사용하는 어떤 PC 에서도 개발된 DLL 을 복사해 넣는 것만으로 절삭 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

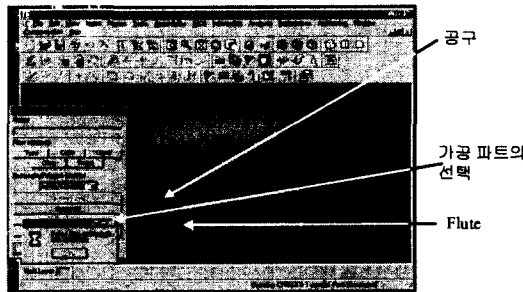


Fig. 3 Simulation for Determination of Cutting Force

Fig. 3 의 사용자 모듈이 시작되면 절삭에 참여하는 절삭날(Engaged Cutter)의 상한(Upper Limit)과 하한(Lower Limit)이 Boolean Operation 을 통해서 계산된다. 즉 공구가 Fig. 2 에서 보이는 과정을 통해 결정된 가공계획대로 이동을 시작하고, 이동 중에 공작물과 만나게 되면 공구와 공작물의 Boolean Operation 을 통해서 공구의 1 회전 동안에 절삭되어진 부분의 곡면정보(또는 절삭 되는 칩의 형상)를 3 차원적으로 얻을 수 있다. 이제 절삭 날과 가공물의 절삭 된 부분의 곡면정보를 이용해서 Boolean Operation 을 수행함으로써 절삭 날에서 절삭에 참여하는 부분의 상한과 하한을 결정할 수 있다. Fig. 4 는 개발된 프로그램의 실행 화면을 캡처한 것인데 이러한 결과로 얻어진 결과를 잘 보여주고 있다.

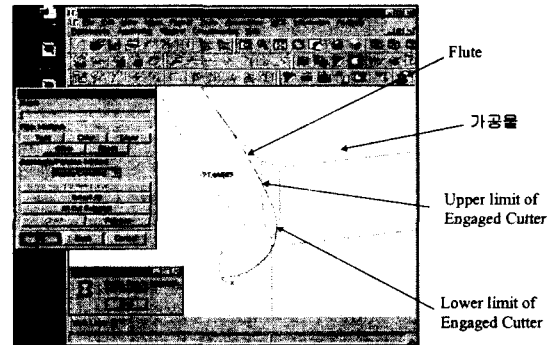
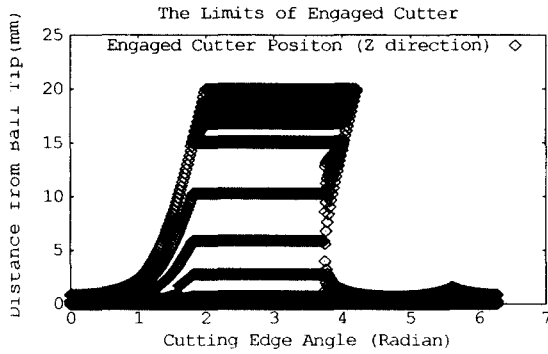
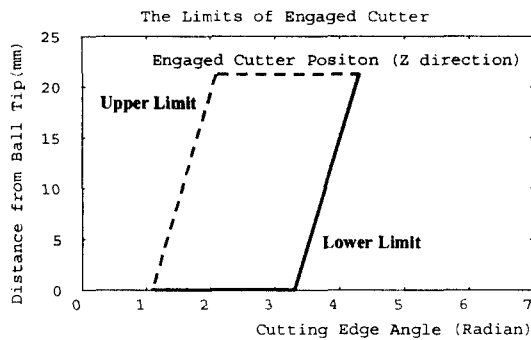


Fig. 4 Determination of Upper Limit and Lower Limit of Engaged Cutter

공구가 가공물의 절삭하기 위해서 회전하기 때문에 절삭에 참여하는 절삭 날의 상한과 하한은 계속해서 변하게 된다. 공구가 1 회전 하는 동안 절삭 날의 상한과 하한을 연속적으로 기록하면 Fig. 5(a)의 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5(b)에서 점선은 상한을, 실선은 하한을 나타낸다. 사실 이론적으로는 Fig. 5(b)와 같은 결과가 얻어 져야 한다. 실제에서는 공구는 연속적으로 움직이지만, Simulator 내에서는 공구가 불연속적으로 움직이는데 이때 불연속의 두 공구사이의 절삭과정이 개발된 모듈 안에서는 아직 정확히 Simulation 되지 못하고 있다. 때문에 Fig. 3 에서 보이는 작업(공구와 공작물의 Boolean Operation)에서 공구와 가공물의 절삭이 완벽하게 모사 되지 못하여서 Fig. 5(a)의 결과를 얻게 된다. 그러나 이 문제는 빠른 시일 내에 쉽게 해결될 수 있으리라고 생각된다. 이제 Fig. 5 의 결과를 식(3)에 대입하면 공구에 작용하는 절삭력을 계산할 수 있다. 가공물의 형상이 아무리 복잡하다 할지라도 식(3)에서 요구하는 적분구간 정보를 제공할 수 있다.



(a) Real Result from our Simulator



(b) Ideal Result from Determination of Upper Limit and Lower Limit of Engaged Cutter during Rotation

Fig. 5 Variation of Upper Limit and Lower Limit of Engaged Cutter during Rotation

4. 결론

복잡한 형상의 공작물의 가공에 있어서 절삭력을 예측하는데 가장 어려운 점 중의 하나가 바로 절삭날의 어떤 부분이 절삭에 참여하고 있는지를 판단하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 이 문제를 실용적으로 해결하기 위해서 상용의 3D Modeler를 사용해서 절삭에 참여하는 절삭날의 상한과 하한을 결정 하는 데에 관한 연구결과를 소개하였다. 이 연구결과는 상용의 3D Modeler를 사용하기 때문에 실효성의 측면에서 그 유용성이 매우 우수하다고 할 수 있다.

추후에는 본 연구에서 아직 정확히 구현되지 못한 부분을 보완해서, 절삭력의 계산 뿐만 아니라 절삭력에 의한 공구의 변형을 고려하고자 한다. 즉 공구의 가공경로를 변화시켜 공구의 변형을 최소화함으로써 가공정도를 향상시키는 방법에 관한 연구를 계속 진행할 계획이다. 이것은 실제 가공 전에 가상가공을 실시함으로써 가공조건을 최적화할 수 있기 때문에 시간적, 비용적 측면에서 매우 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 6은 이

러한 연구를 통해서 얻어질 사용자 모듈의 개념을 나타낸다.

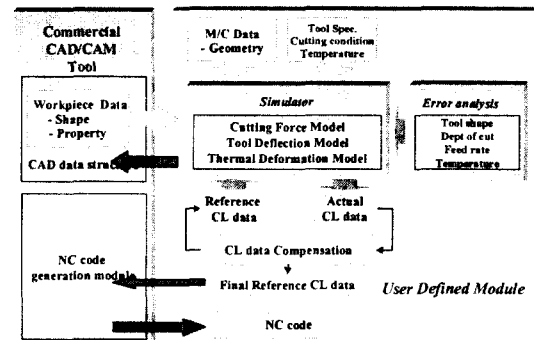


Fig. 6 User defined module for verification of cutting force and tool deflection

참고문헌

1. B. M. Imani, M. H. Sadeghi, M. A. Elbestawi, "An Improved Process Simulation for Ball-end Milling of Sculptured Surfaces," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 1089-1107, 1998.
2. G. Yucesan, Y. Altintas, "Prediction of Ball End Milling Forces," *J. of Engineering for Industry*, Vol. 118, pp. 95-103, Feb. 1998.
3. H. Y. Feng, C. H. Menq, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," *J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 95-103, Nov. 1996.
4. P. LEE, Y. Altintas, "Prediction of Ball-End Milling Forces from Orthogonal Cutting Data," *J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 36, No.9, pp. 1059-1072, 1996.
5. H. Y. Feng, C. H. Menq, "A Prediction of Cutting Forces in The Ball-End Milling Process - I. Model Formulation and Model Building Procedure," *J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 5, pp. 697-710, 1996.
6. G. M. Kimm, P. J. Cho, C. N. Chu, "Cutting Force Prediction of Sculptured Surface Ball-End Milling Using Z-map," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 277-291, 1998.